

## Анализ особенностей дистанционных методов обнаружения частичных разрядов в высоковольтной изоляции и возможностей их одновременного использования

*А.С. Маркелов, М.Е. Надеждина, С.А. Соловьев*

*Казанский государственный энергетический университет, Казань*

**Аннотация:** В настоящем исследовании рассмотрены совмещения нескольких неразрушающих методов обнаружения частичных разрядов (ЧР) для повышения точности их детектирования. Проведен анализ методов детектирования ЧР в высоковольтной изоляции, рассмотрение их особенностей, анализ возможности их совмещения для достижения наиболее точных измерений. Анализ практической результативности совмещения методов проводился, исходя из разработанных вариаций установок, работающих на принципах двух и более методов детектирования. Рассмотрены варианты установок для обнаружения ЧР, которые совмещают в себе два и более методов обнаружения. Дано заключение о возможности совмещения различных методов детектирования ЧР с учетом особенностей такого рода совмещения. Наиболее простым и действенным на данный момент является использование измерительных ячеек, которые совмещают в себе электромагнитный и акустический методы обнаружения.

**Ключевые слова:** частичные разряды, методика неразрушающего контроля изоляции, высоковольтный изолятор, методы диагностики изоляторов.

### Введение

Энергетическое оборудование подвергается высоким нагрузкам и работает в условиях, способствующих возникновению и развитию дефектов. Это может привести к полному выходу оборудования из строя. Одним из наиболее распространенных дефектов является электрический пробой, который может возникнуть в результате износа оборудования, нарушения правил эксплуатации или воздействия внешних факторов. Пробой может развиваться и привести к короткому замыканию, которое, в свою очередь, может вызвать пожар или выход из строя всего оборудования. По этой причине важно своевременно обнаружить и устранить дефекты, чтобы предотвратить возможные аварийные ситуации и обеспечить надежную и безопасную работу оборудования.

Устройства передачи и распределения электрической энергии высокого напряжения, нуждающихся в контроле и диагностировании в процессе

---

эксплуатации, особенную значимость имеют высоковольтные изоляторы (ВИ) [1]. Возникающие на них дефекты обусловлены частичными разрядами (ЧР), которые являются локальным электрическим разрядом. На основании необходимости регистрации частичных разрядов для последующих их обработки, были разработаны несколько методов детектирования ЧР [2, 3], каждый из которых, в свою очередь, обладает определенными преимуществами и недостатками.

В последние десятилетия XX века основным способом проверки электрического состояния высоковольтного оборудования были стендовые измерения его показателей, что требовало временного вывода устройства из эксплуатации. В настоящее время контроль за оборудованием начинает носить все более дистанционный и автономный характер. Тем не менее, все еще существуют предприятия, которые ограничиваются лишь визуальным осмотром оборудования или же используют устаревшие контактные технологии. Создается все больше современных методов для контроля состояния ВИ, которые могут быть применены для дистанционной и безопасной работы [4, 5].

В работе [6] представлены две возможные установки, которые позволяют фиксировать ЧР. Первая установка применяет контактный метод, который является сугубо электрическим. Вторая установка основана на бесконтактном методе, который совмещает в себе уже несколько методов детектирования, а именно акустический и электромагнитный. Работа [7] проводит комплекс, в состав которого входят ячейки, состоящие из акустических и электромагнитных антенн, которые каждая по отдельности может детектировать образовавшиеся на ВИ частичные разряды. Также в данном научном труде показаны идеи и практическая реализация метода, основанного на электрооптическом эффекте.

---

Научное исследование [8] раскрывает влияние мощных частичных разрядов на состояние материала, а точнее доказывает повышенную деградацию материала при их появлении. Данная работа показывает схемы электрофизических процессов в диэлектрических полостях дефектов на неисправном стержне и контакте «стержень-оконцеватель» в течение одного периода приложенного высокого напряжения.

В научной статье [9] выдвигается модель по обнаружению ЧР, которая основана на импульсном методе. По результатам исследований на стендовой модели, а также в компьютерной среде *MicroCup*, была выявлена связь между формой осциллограмм тока и наличием/отсутствием ЧР в исследуемом объекте, в результате чего сделаны выводы о влиянии науглероживания дефектов при ЧР на форму получаемых осциллограмм. Работа [10] представляет обширное математическое описание механизма возникновения ЧР, а также прогнозирования появления включения. Проведенные моделирования подтвердили выдвинутые описания и взаимосвязь ЧР с состоянием изоляции.

В статье [11] представлен общий обзор частичных разрядов в силовых кабелях. Он начинается с обсуждения важности обнаружения частичного разряда и его влияния на непрерывность работы и надежность энергосистем. Затем приводится описание изоляции с объяснением процесса, который приводит к ее разрушению. Объясняются напряжения в пустотах внутри силового кабеля и обсуждается эквивалентная схема. Также происходит обсуждение наиболее распространенных методов обнаружения частичных разрядов в автономном и оперативном режиме, особенно в силовых кабелях. Обсуждаются также методы локализации частичных разрядов внутри силового кабеля. Также кратко объясняются наиболее распространенные методы шумоподавления сигнала. Наконец, дается глубокое понимание текущих проблем и трудностей в обнаружении и мониторинге ЧР.

---

В работе [12] были установлены принципы диагностики, которые позволяют выделять нерабочие изоляторы, а также прогнозировать срок службы рабочих. Сделано это благодаря двухканальному методу дистанционного неразрушающего контроля высоковольтных изоляторов, позволяющему определять рабочее состояние изолятора, находящегося под высоким рабочим напряжением.

Научная работа [13] демонстрирует метод диагностики состояния ВИ. Метод основан на непрерывном мониторинге уровня излучения, получаемого с помощью электромагнитных датчиков, который в свою очередь привязан к фазе сетевого напряжения.

В настоящем исследовании проведен анализа методов детектирования ЧР в ВИ, а также рассмотрение возможности совмещения методов для увеличения точности проводимых измерений. Обобщены результаты отдельных методов детектирования и формирования единого вывода о возможностях практического совместного использования. Использование рассмотренных совмещенных методов может сделать обнаружение неисправностей наиболее точным и облегчить этот процесс по сравнению с некоторыми уже существующими методами детектирования.

### **Материалы и методы**

Объектом исследования является частичный разряд в высоковольтных изоляторах. Основными материалами для ВИ служат фарфор, стекло и различные полимеры. Частичный разряд является физическим явлением, которое возникло в результате частичного пробоя материала изолятора из-за приложенного к нему напряжения. Основными проявлениями частичных разрядов являются генерируемые ими акустические и электромагнитные волны. Кроме того, им также присущи химические проявления, которые вызывают выход из строя изоляции, а также оптические эффекты в виде излучения света. Частичные разряды можно назвать стохастическим

процессом, поскольку их возникновение не может быть однозначно предсказано. Возникновение ЧР напрямую связано с размером дефекта, величиной электрического поля, воздействующего на него, а также зависит от загрязненности самого оборудования им подверженного.

Как уже было упомянуто, в зависимости от различных проявлений частичных разрядов, существует несколько основных методов их обнаружения. К ним можно отнести акустический, электромагнитный, оптический и химический методы. Существуют также и другие, менее распространенные методы, такие, как, например, ультрафиолетовый или телевизионный.

#### *Акустический метод*

Основной идеей акустического метода является отслеживание акустических волн, которые генерируют ЧР в изоляции высоковольтных объектов. Для этого используются специализированные акустические датчики, которые обнаруживают эти волны. Для того чтобы обнаружить разряд, который возник внутри материала, необходимо, чтобы датчик имел непосредственный акустический контакт с материалом изолятора. Когда ЧР возникают на поверхности дефекта, акустические волны, которые порождаются, распространяются сферически. Благодаря данному факту, эти волны можно регистрировать и измерять бесконтактно.

Датчики, улавливающие акустические сигналы от ЧР, чувствительны с определенным частотам, а именно к частотам диапазона от 20 Гц до 500 кГц. Стоит учитывать определенные факторы при расстановке подобного рода датчиков. При условии распространения акустического сигнала на частоте 40 кГц, приемник акустического сигнала должен располагаться не дальше чем в 40 метрах от источника сигнала.

Одним из самых распространенных способов регистрации акустической волны ЧР является использование микроэлектромеханических систем (МЭМС) и пьезоэлектрических датчиков ультразвука (рисунок 1).

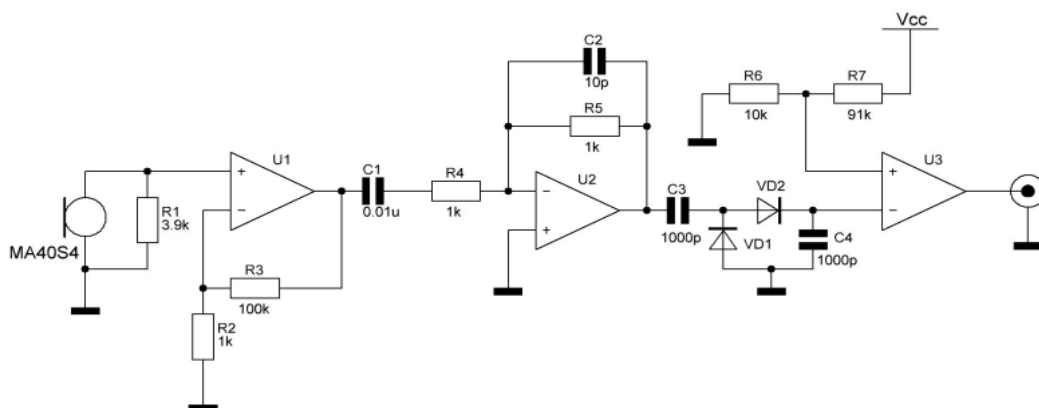


Рис. 1. – Ультразвуковой приемник на основе пьезоэлектрического датчика  
*Электромагнитный метод*

Электромагнитный метод характеризуется высоким уровнем стабильности, а также возможность выбора полосы частот, на которых будут производиться измерения. Электромагнитный метод базируется на использовании антенн-датчиков, которые регистрируют электромагнитные волны и передают данные о них на компьютер/сервер для последующей их обработки и анализа. На выходе получают данные, преобразованные в частотно-временную spectrogramму и частотную spectrogramму, синхронизированную по фазе с напряжением сети. Современные алгоритмы обработки данных, включая использование нейронных сетей, позволяют более точно обрабатывать сигналы и эффективно находить местоположение, тип и степень опасности дефекта. После обработки информация передается в диспетчерские пункты, которые уведомляют персонал о возникших ЧР, что позволяет им разработать рациональные стратегии технического обслуживания объектов. Данная информация имеет важное значение для обеспечения надежности и безопасности работы технического оборудования.

Из-за того, что частичный разряд имеет широкий диапазон частот, начиная с 30 МГц и до 2,7 ГГц, он требует анализа сигналов в этом диапазоне с шагом до 5 МГц. Однако на частотах с высокочастотными помехами такой анализ не проводится. Чтобы определить местоположение дефектного изолятора, можно произвести измерение мощности электромагнитного излучения с помощью устройств контроля, имеющих приемные УВЧ антенны. Важно установить четыре устройства контроля в известных координатах и произвести измерения амплитуды мощности на каждом из них одновременно. Таким образом, можно осуществить пространственное определение местоположения дефектного изолятора.

#### *Оптический метод*

Одним из методов регистрации ЧР является оптический метод. Данный метод чаще используется для регистрации разрядов в оптоволоконных кабелях, чем в высоковольтных изоляторах.

Регистрация оптического излучения поверхностного частичного разряда (ПЧР) может быть осуществлена с помощью фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), обладающих высокой чувствительностью к оптическому излучению или с помощью электронно-оптических преобразователей (ЭОП), обладающих специфическими характеристиками для регистрации оптического излучения ПЧР. Кроме всего прочего, ЭОП в отличие от ФЭУ позволяет наблюдателю не просто регистрировать интенсивность оптического излучения, но и видеть сам объект излучения, что в свою очередь сильно облегчает процесс регистрации оптического излучения ПЧР.

Одной из основных характеристик является спектр свечения ПЧР, который перекрывает диапазон от 200 до 1000 нм с максимумом излучения на длине волны, равной 337,1 нм. Спектр может быть линейчатым (разряды на чистых изоляторах) и смешанным (ПЧР в виде дужек на загрязненной и

---

влажной изоляции). Очевидно, что для надежной регистрации оптического излучения ПЧР необходимо, чтобы область спектральной чувствительности фотокатода (ФК) ЭОП перекрывала спектральную область излучения ПЧР.

#### *Химический метод*

Возникновение импульса ЧР приводит к инициированию разнообразных химических реакций в точке его возникновения. Химические реакции приводят к разложению изоляционных материалов на компоненты, которые в свою очередь могут распадаться или объединяться в другие химические элементы. Хроматографический метод анализа растворенных газов (ХАРГ) зачастую применяется при обследовании трансформаторного оборудования. Возникающие ЧР вызывают химические реакции, в процессе которых часть масла распадается на водород и углерод. Образовавшийся углерод оседает на изоляции, а водород остается в растворенном виде в масле и из-за чего может быть обнаружен при помощи ХАРГ. Также импульсы ЧР высокой энергии и искровые разряды могут вызывать образование ацетилена. В электрогазовом оборудовании происходят аналогичные процессы. Электроизоляционный газ  $SF_6$  распадается на  $SF_4$ , который затем диссоциирует на  $SOF_2$  и  $SO_2F_2$ . Однако, на практике, методика диагностики ЧР с использованием этих процессов не пользуется большой популярностью, так как для фиксации изменений в газовом составе необходимо продолжительное время. Инертность процесса является недостатком, поскольку в некоторых случаях она мешает своевременному обнаружению ЧР. Кроме того, этот метод не позволяет обнаружить ЧР, происходящие в глубине твердой изоляции.

#### *Необходимость сочетания методов как способ повышения достоверности исследований*

Частичные разряды способствуют излучению света, генерации акустических и электромагнитных волн, а также влекут за собой химическое

---



разложение материалов изоляции. Данные физические и химические последствия можно детектировать различными методами диагностики и соответствующими им датчиками (чувствительными элементами). Именно по причине разной природы проявлений ЧР важно детектировать их различными методами для повышения точности измерений.

Кроме традиционного метода измерения электрических параметров, описанного в *IEC 60270 - 2000*, существуют различные нетрадиционные методы, используемые для обнаружения и измерения частичных разрядов. При помощи объединения акустического и электромагнитного определения ЧР может быть повышена чувствительность акустических измерений. Это возможно благодаря тому, что акустический шум не порождает электромагнитных наводок и сигналов, а электромагнитные помехи не вызывают акустических шумов и сигналов. Следствием этого является повышение достоверности результатов испытаний ЧР, проведенных комбинированным способом. Применение оптических и химических подходов усложняет процесс испытания из-за сниженной автономности, хотя и обладает рядом преимуществ.

Необходимость сочетания методов можно в полной мере оценить на сверхбольших частичных разрядах. Характеристики сверхбольших частичных разрядов (СБЧР), измеренные с помощью акустических и электромагнитных датчиков, свидетельствуют о том, что акустический метод предоставляет более точные данные о размерах дефектов, чем электромагнитный метод. Отличия, которые можно заметить в полученных результатах, можно объяснить следующим образом. Акустическая волна возникает во время прохождения стримером газовой прослойки диэлектрика и именно в этот момент происходит измерение. Электромагнитные проявления включают распространение импульса ЧР по поверхности диэлектрика. Если диэлектрик мал, то индуцированные поля  $E_s$

---

несущественны и слабо сказываются на общем поле. Поэтому фаза распределения интенсивности ЧР и их количества зависит от приложенного поля на дефекте  $fE_a$ . Исходя из этого факта, на практике возникает ситуация, что характеристики, полученные акустическими и электромагнитными методами для малых диэлектриков, имеют почти идентичные значения.

Индукцированные предшествующими ЧР поля  $E_s$  будут иметь заметно большее значение при росте размера самого дефекта. По формуле (1) можно вычислить общее поле внутри дефекта, которое будет равняться сумме напряженностей полей, его образующих.

$$E_d = fE_a + E_s, \quad (1)$$

где  $E_a$  – напряженность поля, приложенного к электродам напряжения;  $f$  – фактор изменения напряженности приложенного поля, зависящий от геометрии полости дефекта и соотношения диэлектрических проницаемостей газа и диэлектрического стержня.

Проявление подобного эффекта можно наиболее отчетливо заметить между оконцевателем изолятора и его стержнем. При использовании электромагнитного метода измерения дефектов в материалах, происходит распространение импульса ЧР вдоль диэлектрической поверхности дефекта. На первой стадии образуется ЧР, который имеет распространение стримера в плоскости, которая параллельно приложена полю. На второй стадии этот разряд сменяется другим ЧР, который уже имеет распространение вдоль диэлектрической поверхности. Последняя, в свою очередь, имеет перпендикулярную ориентацию относительно поля  $E_a$ . На второй стадии повышение температуры, а также проводимости канала поверхностного разряда связано с тем, что дрейфующие заряды прижимаются к поверхности диэлектрика за счет нормальной компоненты  $E_a$ . Одновременно с этим, на некоторых фазах приложенного напряжения, как ширина, так и количество импульсов, а также интенсивность СБЧР могут уменьшаться в большую или

---

меньшую сторону. Исходя из этого, можно предположить, что при использовании акустического метода для обнаружения дефектов, можно точно определить общее количество импульсов ЧР, включая СБЧР, а также их распределение по фазам. Именно с целью взаимного дополнения друг друга важно сочетать методы для достижения наиболее точных результатов.

### Результаты и обсуждение

Рассмотренные методы детектирования, а также установки, работающие на их принципах [6, 7], позволяют понять, что для достижения наиболее точных результатов измерений необходимо сочетать методы друг с другом. Излучение от ЧР обладает короткими, длящимися от  $10^{-7}$  до  $10^{-10}$  с, импульсами электромагнитной природы в широком диапазоне частот, находящиеся в пределах от  $10^5$  до  $10^{17}$  Гц, а также акустическими импульсами с частотами 20Гц - 200кГц.

Благодаря вышеописанным методам можно дистанционно и бесконтактно детектировать ЧР. Электромагнитный метод имеет преимущество в виде повышенной чувствительности измерений, но обладает при этом и недостатками: радиопомехи или возникающие разряды от неподверженного обследованию оборудования, могут негативно сказываться на точности и достоверности измерений. Эти факторы снижают общую точность проводимых измерений. Метод, использующий в своей основе знания о акустической составляющей ЧР, весьма устойчив к помехам и также, что является несомненным преимуществом, обладает достаточно высокой разрешающей способностью. Но стоит отметить, что чувствительность такого метода измерения ЧР куда ниже, чем у электромагнитного. Химические методы детектирования слишком не инертны и не автономны, что не позволяет своевременно обнаруживать дефекты в ВИ. Таким образом можно понять, что только совмещение

---

методов друг с другом сможет сделать обнаружение дефектов в оборудовании точным и более полным.

На примерах установок, на которые был сделан упор, можно сделать определенные выводы о сочетании методов, которые лежали в их основе. Так, установка [б], совмещала в себе акустический и электромагнитный методы детектирования, позволила собрать данные для построения амплитудно-фазовых, частотно-фазовых характеристик, а именно амплитуды и количества импульсов ЧР. Наглядно характеристики бездефектного и дефектного ВИ можно оценить на рисунках 2 и 3.

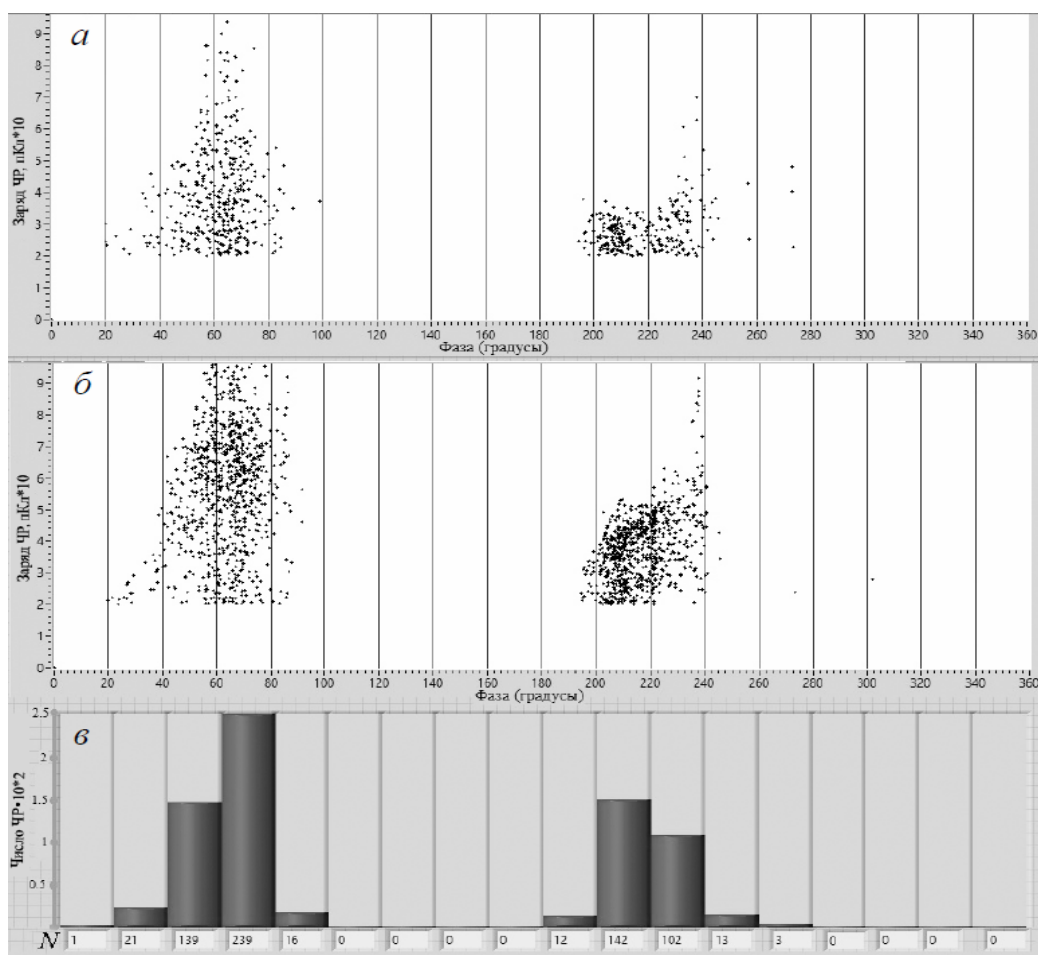


Рис. 2. – Характеристики ЧР для бездефектного изолятора: *а* и *б* – амплитудно-фазовые характеристики, детектированные электромагнитным (*а*) и акустическим (*б*) датчиками; *в* – распределение количества (*N*) ЧР от фазового угла напряжения, детектированных электромагнитным датчиком

На основе представленных графиков можно увидеть, что различия в интенсивности и числе частичных разрядов в фазовых интервалах с наивысшей интенсивностью, а также в их фазовом распределении внутри каждой группы ВИ невелики и отличаются не более чем в 1,5 раза. Однако, между группами работоспособных и дефектных ВИ эти различия проявляются значительно сильнее и могут достигать 3 – 5 раз. Различие в определении количества ЧР обусловлено используемыми методами детектирования. Стоит отметить, что положение максимальных фазовых интервалов ЧР совпадает для обоих методов, лежащих в основе измерений.

Установка, которая была предложена в исследовании [7], реализована на использовании измерительных ячеек, которые по своему функциональному предназначению являются подобием первой установки, лишенной блока, отвечающего за обработку полученных данных (ПК). Использование этих ячеек позволяет наиболее точно детектировать возникающие ЧР за счет возможности их установки в нескольких местах наблюдения, что в свою очередь ведет к уменьшению влияния на конечный результат измерений электромагнитных наводок или акустических помех от рядом стоящего электротехнического оборудования, которое может воздействовать на конкретную измерительную ячейку. Важным преимуществом второго типа установки является применение беспроводного обмена данными между ячейками и компьютером, осуществляющим обработку полученных сведений. Это позволяет разместить диспетчерский пункт дальше от тестируемого объекта, не нуждаясь в прямом контакте с ним.

Установка, работающая на принципах электрооптического метода, приведенная в работе [7], позволяет, в отличие от других способов детектирования ЧР, обнаружить место образования самого разряда, а также сам момент возникновения преддефектного состояния ВИ. Достигается это за

---

счет измерения градиентов напряженности электрического поля в конкретной точке.

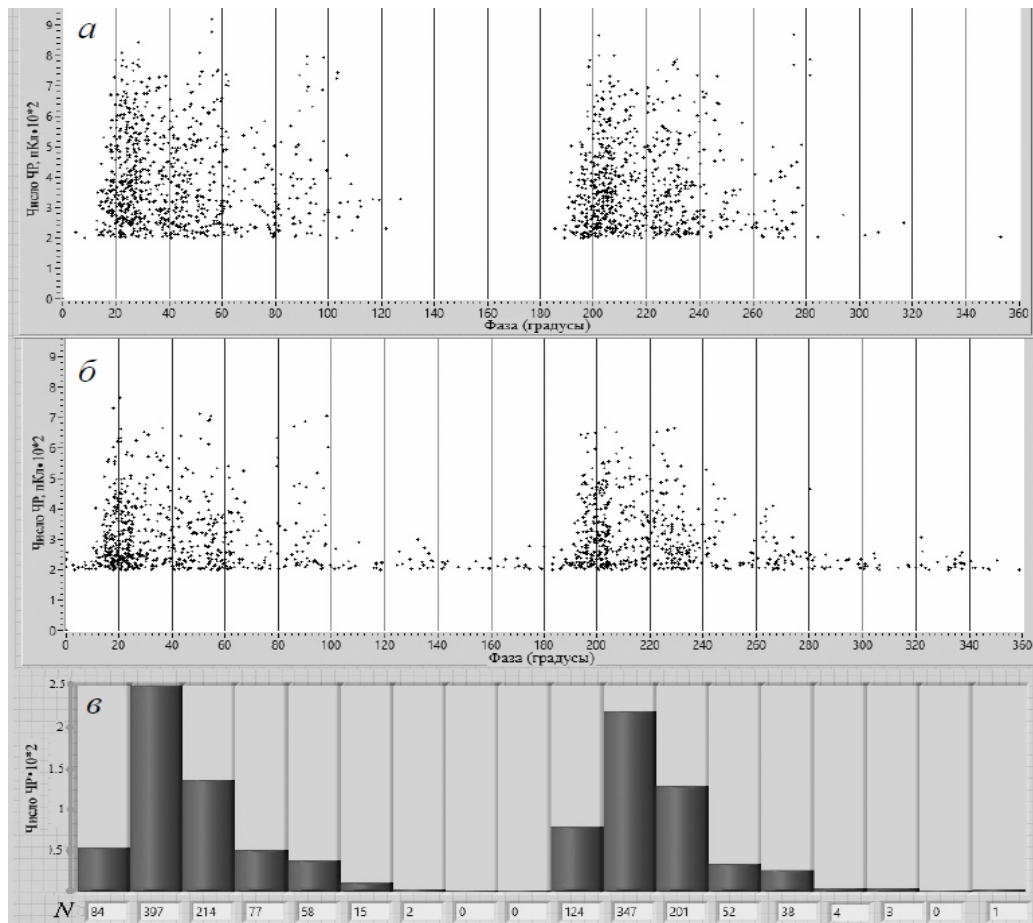


Рис. 3. – Характеристики ЧР для дефектного изолятора: *а* и *б* – амплитудно-фазовые характеристики, детектированные электромагнитным (*а*) и акустическим (*б*) датчиками; *в* – распределение количества (*N*) ЧР от фазового угла напряжения, детектированных электромагнитным датчиком

### Заключение

Частичный разряд является важным физическим явлением, которое требует принимать своевременные и доступные меры по детектированию. Именно на достижение этих целей и направлены усилия разработчиков электроники. Одним из перспективных направлений является создание оборудования, способного работать в онлайн-режиме с использованием современных датчиков и систем передачи данных. Это позволяет

дистанционно контролировать состояние ВИ, не находясь непосредственно возле самих изоляторов, что существенно повышает безопасность обслуживающего персонала и эффективность процесса контроля.

Таким образом, современные технологии и оборудование для измерения ЧР в ВИ развиваются и совершенствуются. Они способствуют повышению эффективности контроля и управления энергосистемами, а также обеспечению надежной и безопасной эксплуатации высоковольтного оборудования.

### Литература

1. Поляков Д.А., Никитин К.И., Терещенко Н.А., Новосёлов А.С., Билевич Я.П. Исследование частичных разрядов в опорных изоляторах // Омский научный вестник. 2020. №1(169). С. 32-38.

2. Свистунов Н.А. Анализ методов диагностики технического состояния электротехнических устройств, основанные на обнаружении и измерении уровня частичных разрядов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. № 12. С. 100-102.

3. Mor A.R., Heredia L.C.C., Harmsen D.A., Muñoz F.A. A new design of a test platform for testing multiple partial discharge sources // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2018. V. 94. pp. 374-384.

4. Wen T., Zhang Q., Ma J., Liu X., Wu Z., Zhang L., Zhao J., Shimomura N., Chen W. Research on the detecting effectiveness of on-site lightning impulse test for GIS equipment with insulation defects // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. V. 25, I. 2. pp. 551-558.

5. Illias H.A., Chen G., Lewin P.L. Comparison between three-capacitance, analytical-based and finite element analysis partial discharge models in condition monitoring // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2017. V. 24. I. 1. pp. 99-109.

6. Иванов Д.А., Галиева Т.Г., Голенищев-Кутузов А.В., Садыков М.Ф., Калимуллин Р.И., Семенников А.В. Детектирование акустических сигналов частичных разрядов на дефектах изоляционного оборудования // Омский научный вестник. 2021. № 6 (180). С. 48-55.

7. Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Потапов А.А., Кротов В.И. Использование бесконтактных методов диагностики высоких электрических полей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. №4. С. 123- 133.

8. Иванов Д.А. Исследование электрофизических процессов и старения материала высоковольтных изоляторов для определения их рабочего ресурса // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 2. С. 132-146.

9. Стругов В.В., Лавринович В.А. Схемотехническое моделирование процессов проявления частичных разрядов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 12. С. 91-100.

10. Дубяго М.Н. Исследование характеристик частичных разрядов в электрической изоляции систем электроснабжения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 11 (148). С. 201-207.

11. Refaat S.S., Shams M.A. A Review of Partial Discharge Detection, Diagnosis Techniques in High Voltage Power Cables // 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering. IEEE, 2018. pp. 1-5.

12. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., Хуснутдинов Р.А., Марданов Г.Д., Евдокимов Е.А. Комплексный метод дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5-6. С. 87-93.

---



13. Галиева Т.Г., Иванов Д.А. Садыков М.Ф., Андреев Н.К., Хамидуллин И.Н. Метод и устройство диагностики состояния высоковольтных изоляторов на основе непрерывной регистрации пространственного уровня электромагнитного излучения частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 4. С. 165-177.

### References

1. Polyakov D.A., Nikitin K.I., Tereshenko N.A., Novoselov A.S., Bilevich Y.P. Omskij nauchnyj vestnik. 2020. №1 (169). pp. 32-38.
2. Svistunov N.A. Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. 2018. № 12. Pp. 100-102.
3. Mor A.R., Heredia L.C.C., Harmsen D.A., Muñoz F.A. International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2018. V. 94. pp. 374-384.
4. Wen T., Zhang Q., Ma J., Liu X., Wu Z., Zhang L., Zhao J., Shimomura N., Chen W. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. V. 25, I. 2. pp. 551-558.
5. Illias H.A., Chen G., Lewin P.L. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2017. V. 24. I. 1. pp. 99-109.
6. Ivanov D.A., Galieva T.G., Golenishchev-Kutuzov A.V., Sadykov M.F., Kalimullin R.I., Semennikov A.V. Omskij nauchnyj vestnik. 2021. № 6 (180). pp. 48-55.
7. Golenishchev-Kutuzov A.V., Ivanov D.A., Potapov A.A., Krotov V.I. Izvestiya visshih uchebnykh zavedenii. Problemi energetiki. 2019. V. 21. №. 4. pp. 123- 133.
8. Ivanov D.A. Izvestiya visshih uchebnykh zavedenii. Problemi energetiki. 2022. V. 24. №. 2. pp. 132-146.
9. Strugov V.V., Lavrinovich V.A. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2016. V. 327. № 12. pp. 91-100.



10. Dubyago M.N. Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. 2013. № 11 (148). pp. 201-207.
11. Refaat S.S., Shams M.A. 12-th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering. IEEE, 2018. pp. 1-5.
12. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A., Husnutdinov R.A., Mardanov G.D., Evdokimov E.A. Izvestiya visshih uchebnykh zavedenii. Problemi energetiki. 2016. № 5-6. С. 87-93.
13. Galieva T.G., Ivanov D.A. Sadykov M.F., Andreev N.K., Khamidullin I.N. Izvestiya visshih uchebnykh zavedenii. Problemi energetiki. 2022. Vol. 24. №. 4. pp. 165-177.

**Дата поступления: 2.04.2024**

**Дата публикации: 12.05.2024**